

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิเอสเทอร์ (Polyester) [1]

พอลิเอสเทอร์ คือ พอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ (-C-O-) อยู่ในสายโซ่โมเลกุลส่วนที่เป็นสายโซ่หลัก (main chain) ซึ่งจัดว่าเป็นพอลิเมอร์กลุ่มใหญ่ที่สุดกลุ่มหนึ่ง ที่สามารถนำไปใช้งานได้หลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นลามิเนต เรซินหล่อ เส้นใย พิล์ม เรซินเคลือบผิว ยาง และพลาสติกไซเซออร์ (plasticizers)

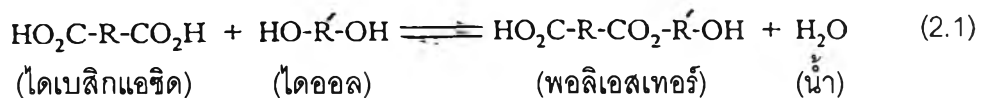
2.1.1 การแบ่งประเภทของพอลิเอสเทอร์

พอลิเอสเทอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. พอลิเอสเทอร์ชนิดอิ่มตัว (saturated polyesters) คือ พอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างอิ่มตัว ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง ได้แก่ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท (PET) เป็นต้น
2. พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyesters) คือ พอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง และสามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางในภายหลัง จนได้โครงสร้างแบบร่างแห เช่น อัลคิเดเรซิน และพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (UPE) เป็นต้น

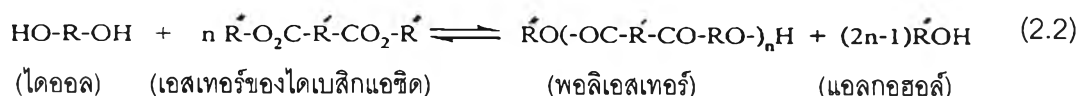
2.1.2 ปฏิริยาเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์

1. ปฏิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) เป็นปฏิริยาควบแน่นโดยตรงระหว่างไดเบสิกแอซิด (dibasic acids) และไดออล (diol) โดยมีกรดแก่หรือเกลือของกรดแก่เป็นตัวเร่งปฏิริยา ดังสมการที่ 2.1



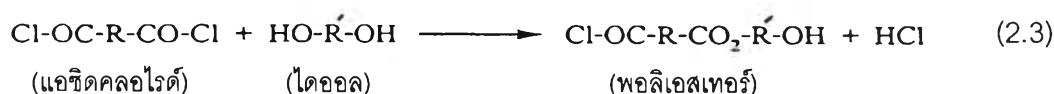
ปฏิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิริยาที่เกิดง่าย และนิยมใช้ในการเตรียมพอลิเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งใช้ในงานที่เกี่ยวกับการผลิตพอลิยูรีเทน

2. ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (Ester interchange) ปฏิกริยานี้ใช้เอสเทอร์ของไดเบสิกแอซิดแทนไดเบสิกแอซิด ดังสมการที่ 2.2



เอสเทอร์ของไดเบสิกแอซิดที่นิยมใช้ได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ (methyl ester, R-COOCH₃) การเตรียมพอลิเอสเทอร์วิธีนี้มักใช้ในกรณีที่ไดเบสิกแอซิดละลายในไดออลได้น้อย

3. ปฏิกริยาระหว่างแอซิดคลอไรด์และไดออล ดังสมการที่ 2.3



ปฏิกริยานี้เกิดได้รวดเร็วแต่จะมีความสิ้นเปลืองในแง่เศรษฐกิจ เพราะต้องมีการเปลี่ยนกรดให้เป็นแอซิดคลอไรด์ จึงไม่นิยมใช้วิธีนี้

4. ปฏิกริยาเปิดวงแลกโตน ดังสมการที่ 2.4

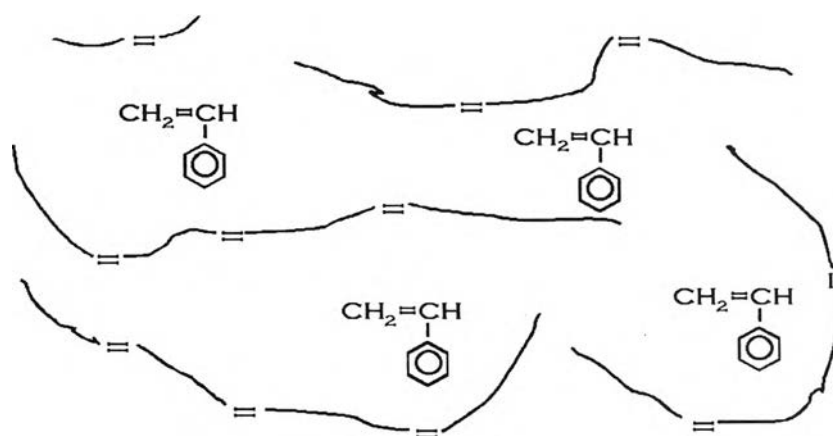


ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาการเตรียมเอสเทอร์ที่ไม่นิยมมากนัก เนื่องจากจะสามารถผลิตพอลิเอสเทอร์ได้น้อยชนิด

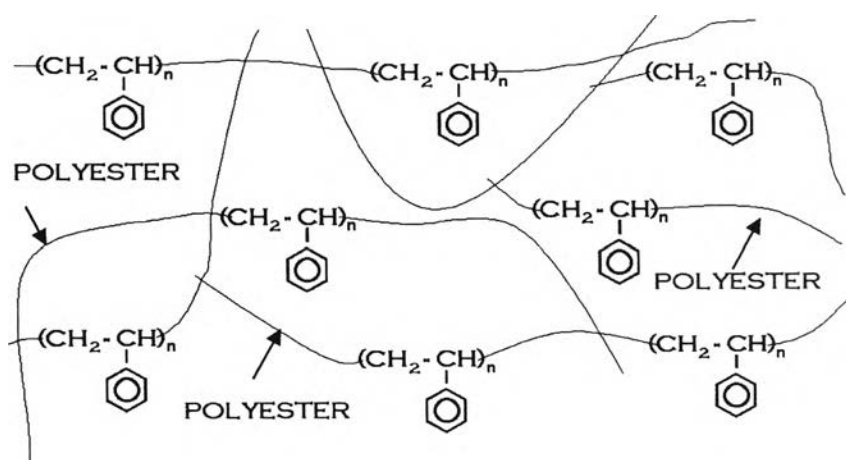
2.2 พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin, UPE resin) [2]

โดยทั่วไปพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีลักษณะเป็นเรซินเหลวสีเหลืองอ่อน และมีดีกรีของพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ที่ค่อนข้างต่ำประมาณ 8-10 (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2,000) ซึ่งภายหลังการผสมกับตัวเร่งปฏิกริยา หรือได้รับการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจะเกิดปฏิกริยาเคมีเปลี่ยนสภาพเป็นพลาสติกแข็ง และไม่สามารถเปลี่ยนเป็นพลาสติกเหลว หรือคืนรูปได้อีก จึงจัดเป็นเทอร์โมเซตพลาสติก และสามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง

โดยทั่วไปพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจะสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ของสารประกอบไกลคอล (glycol) และ ไดเบสิกแอซิด (dibasic acid) ซึ่งไดเบสิกแอซิดที่ใช้โดยทั่วไปเป็นสารผสมของกรดอินทรีย์ที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว เมื่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์สิ้นสุดลง พอลิเอสเตอร์ที่ได้สามารถละลายในตัวทำละลายไม่อิ่มตัว เช่น สไตรีนมอนอเมอร์ (styrene monomer) เพื่อให้คงอยู่ในสภาพของเหลว โดยโมเลกุลของสไตรีนจะแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ พันธะไม่อิ่มตัวของพอลิเมอร์อาจทำปฏิกิริยากับพันธะไม่อิ่มตัวของสไตรีนได้บางส่วน แต่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้เต็มที่เมื่อได้รับความร้อนหรือเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป ดังนั้น สไตรีนมอนอเมอร์จะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางโมเลกุล (crosslinking agent) ได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สไตรีนมอนอเมอร์แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว[2]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างร่างแหของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวภายหลังการแข็งตัว[2]

2.2.1 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ได้แก่

1. **ไกลคอล (glycol)** การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจะใช้ไกลคอลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่ (ไดออล) เป็นสารตั้งต้น และใช้แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ ในการหยุดปฏิกิริยา สำหรับแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่า 2 หมู่ จะทำให้โมเลกุลของพอลิเอสเตอร์ที่ได้มีกิ่งหรือมีการเชื่อมขวาง ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลจะเพิ่มอย่างรวดเร็วจนยากที่จะควบคุม โดยไกลคอลที่นิยมใช้ คือ เอทิลีนไกลคอล (EG) โพรพิลีนไกลคอล (PG) ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) และไดโพรพิลีนไกลคอล (DPG) เป็นต้น ไกลคอลแต่ละชนิดมีผลต่อสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินต่างกัน เช่น ความเหนียว ความหยุ่นตัว ความคงทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิ และความทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น สำหรับ EG จะให้พอลิเมอร์ที่ขุ่นและเกิดผลึกได้ดี ส่วน PG จะให้พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกเล็กน้อย และเรซินที่ได้สามารถละลายเข้ากับสไตรีนได้ดี

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างไกลคอลที่สามารถใช้สังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว[2]

| Glycol | Formula | Molecular weight |
|---|---|------------------|
| Ethylene glycol | $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ | 62 |
| Propylene glycol | $\text{HOC}_3\text{H}_6\text{OH}$ | 76 |
| Butylene glycol | $\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH}$ | 90 |
| Diethylene glycol | $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ | 106 |
| Dipropylene glycol | $\text{HOC}_3\text{H}_6\text{OC}_3\text{H}_6\text{OH}$ | 134 |
| Triethylene glycol | $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ | 150 |
| Isopropylidene bis(<i>p</i> -phenyleneoxypropanol-2) | $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{C}_6\text{H}_4\text{OCH}_2\text{CHOHCH}_3)_2$ | 344 |

2. **กรดไม่อิ่มตัว (unsaturated acid)** ที่นิยมใช้เตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) และกรดฟูมาริก (fumaric acid) หากมีส่วนผสมของกรดไม่อิ่มตัวต่ำ จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางน้อย จึงมีความยืดหยุ่นมาก มอดุลัสต่ำ ว่องไวต่อความร้อนและสารละลายมากขึ้น การแข็งตัวหรือการบ่ม (cure) เกิดได้ช้ากว่า

3. **กรดอิ่มตัว (saturated acid)** ที่นิยมใช้เตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินทางการค้า คือ กรดฟทาลิก (phthalic acid) ซึ่งอยู่ในรูปฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) เนื่องจากหาง่ายกว่าที่อยู่ในรูปของกรด และใช้มากในการทำพอลิเอสเตอร์แข็ง เพื่อช่วยให้พอลิเอสเตอร์ที่ได้มีสมบัติดีขึ้น ไม่แข็งหรือเปราะเกินไป

4. **มอนอเมอร์ไม่อิ่มตัว (unsaturated monomer)** ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีความหนืดสูงในช่วงก่อนการทำให้แข็งตัว ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนหรือภายหลังที่ได้เติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปแล้ว มอนอเมอร์นี้จะถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ ทำให้มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห และทำให้เรซินแข็งตัว ถึงแม้พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจะเกิดการเชื่อมขวางกันเองระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้แต่จะเกิดอย่างช้าๆ และได้ระดับของการเชื่อมขวางต่ำ ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีระดับการเชื่อมขวางสูงและเร็วขึ้น จึงนิยมเติมสารซึ่งมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาลงไป ได้แก่ สไตรีนมอนอเมอร์ หรือไวนิลมอนอเมอร์อื่นๆ ปกตินิยมใช้สไตรีนมอนอเมอร์ เนื่องจากราคาถูก เป็นตัวทำละลายที่ดี และสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเอสเทอร์ในขณะแข็งตัวได้ดี ส่วนสารอื่นๆ ที่นิยมใช้ก็มีบ้าง เช่น เมทิลเมทาคริเลต เป็นต้น

5. **ตัวยับยั้ง (inhibitor)** เนื่องจากสารละลายพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง ซึ่งเมื่อได้รับความร้อน แสง หรือปัจจัยอื่นๆ จะสามารถเกิดอนุมูลอิสระ และทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นเจล (gel) ดังนั้น จึงต้องใส่ตัวยับยั้งเพื่อป้องกันการแข็งตัวของเรซิน และทำให้สามารถเก็บพอลิเอสเทอร์เรซินไว้ได้นาน ช่วยปรับเวลาการแข็งตัว และลดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะพอลิเอสเทอร์เรซินแข็งตัวอีกด้วย ซึ่งตัวยับยั้งที่นิยมใช้จะเป็นสารประเภทควิโนน (quinone) ได้แก่ เบนโซควิโนน (benzoquinone) หรือไฮโดรควิโนน (hydroquinone) เป็นต้น

วัตถุดิบที่เป็นกรดส่วนใหญ่จะเป็นของแข็ง ส่วนไกลคอลเป็นของเหลว ให้เติมวัตถุดิบทั้งสองลงในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) ที่มีอุณหภูมิสูง 200-220 องศาเซลเซียส ขณะเกิดปฏิกิริยาจะมีน้ำเกิดขึ้น และภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีแก๊สออกซิเจนไม่ได้ มิฉะนั้นแล้วจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เรซินที่ได้มีสีเข้ม ดังนั้น จึงมีการเติมแก๊สเฉื่อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไนโตรเจนลงในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งนอกจากจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนแล้ว ยังช่วยพาน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันออกจากถังอีกด้วย ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น นอกจากนี้ อัตราการกวนและความเร็วของแก๊สเฉื่อยที่เข้าไปยังมีส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไปจะมีการวัดขนาดของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น เมื่อได้ขนาดตามต้องการก็จะหยุดปฏิกิริยาโดยเติมตัวหยุดปฏิกิริยา (terminator) และลดอุณหภูมิลง จะได้พอลิเอสเทอร์ที่มีลักษณะแข็งหรือเกือบแข็ง จากนั้นจะถูกถ่ายลงในถังบรรจุสไตรีนมอนอเมอร์ ในขณะที่ละลายพอลิเอสเทอร์ต้องไม่ให้อุณหภูมิในถังเกิน 60 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันพอลิเอสเทอร์เรซินแข็งตัวก่อนนำไปแปรรูป

2.2.2 การแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถแข็งตัวได้หลายวิธี ดังนี้ คือ

1. โดยใช้สารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) และความร้อน
2. โดยใช้สารเริ่มปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) ที่อุณหภูมิห้อง
3. โดยแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet light)
4. โดยลำอิเล็กตรอน (electron beam)

วิธีที่ง่าย สะดวก และนิยมใช้กันมาก ได้แก่ การใช้สารเริ่มปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขณะที่พอลิเอสเทอร์เรซินแข็งตัว คือ ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุลระหว่างสไตรีนมอนอเมอร์และพอลิเอสเทอร์ โดยมีสารเริ่มปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาคอยกระตุ้นและเร่งให้เกิดปฏิกิริยา สำหรับสารเริ่มปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิห้องจะไม่เกิดปฏิกิริยา ต้องอาศัยความร้อนช่วย โดยทั่วไปการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ได้เติมสารเริ่มปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาจนพอลิเอสเทอร์เรซินเริ่มแข็งตัวเป็นเจล และเวลาของการเกิดเจล เรียกว่า เจลไทม์ (gel time)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงหลังจากที่เกิดเป็นเจลจนเรซินแข็งตัวเต็มที่ และเรียกเวลานี้ว่า เคียวไทม์ (cure time)

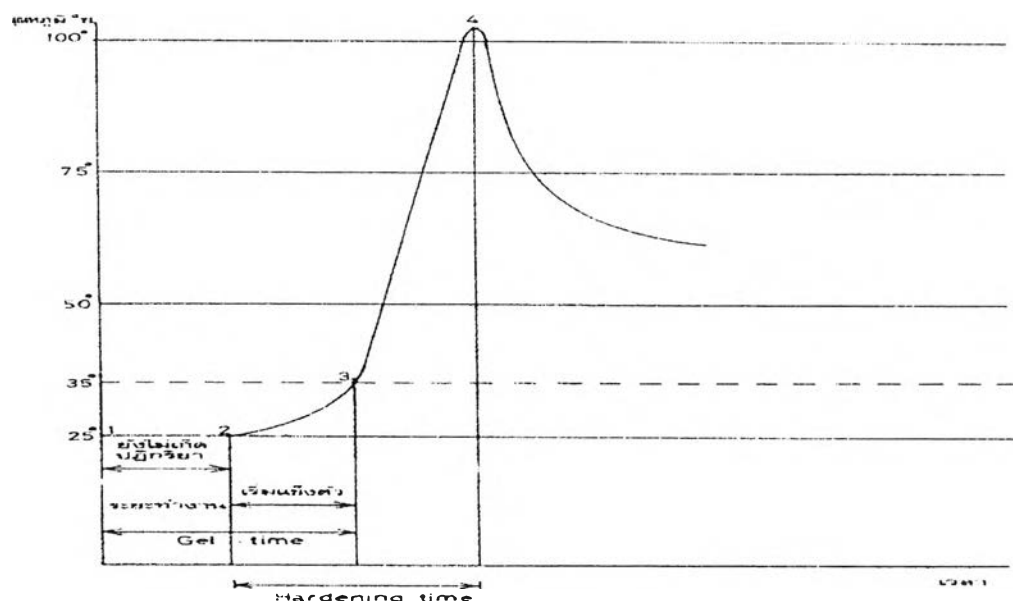
สารเคมีที่ใช้ทำให้พอลิเอสเทอร์เรซินแข็งตัว ได้แก่

1. สารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ช่วยให้พอลิเอสเทอร์แข็งตัวเร็วขึ้น ส่วนใหญ่เป็นสารเปอร์ออกไซด์ ที่นิยมใช้ คือ เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (methyl ethyl ketone peroxide, MEKPO) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide, BPO)

2. ตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) เป็นสารที่ช่วยเร่งให้สารเริ่มปฏิกิริยาทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ส่วนใหญ่เป็นเกลือของโลหะ เช่น โคบอลต์ออกโตเอต (Co-octoate) โคบอลต์แนฟทีเนต (Co-naphthenate) หรือสารประเภทเอมีน ได้แก่ ไดเอทิลอะนิลีน (di-ethyl aniline) ไดเมทิลอะนิลีน (dimethyl aniline) เป็นต้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเกลือของโลหะจะใช้กับสารเริ่มปฏิกิริยา MEKPO แต่สำหรับเอมีนจะใช้กับ BPO

ปฏิกิริยาการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซินเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาภายหลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในรูปที่ 2.3 ขณะที่ปฏิกิริยาการแข็งตัวดำเนินไป ความแข็งของพอลิเอสเทอร์เรซินจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยา ซึ่งเรซินแข็งตัวได้ถึง 95% จากนั้นเรซินจะแข็งตัวต่อไปเรื่อยๆ และเพื่อ

ป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากการแข็งตัวไม่เต็มที่ ในกระบวนการผลิตมักจะนำผลิตภัณฑ์ไปทำ post cure เสียก่อน โดยการอบที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-6 ชั่วโมง



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาขณะเรซินแข็งตัว[2]

ปัจจัยที่มีผลต่อการแข็งตัวของพอลิเอสเตอร์เรซิน คือ

1. อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูง เรซินจะแข็งตัวเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ
2. ปริมาณสารเริ่มปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าปริมาณมากจะแข็งตัวเร็ว
3. ความชื้นหรือน้ำ ถ้าความชื้นสูง การแข็งตัวของเรซินจะช้า โดยปกติปริมาณน้ำที่มีอยู่ในพอลิเอสเตอร์เรซินต้องมีค่าไม่เกิน 0.05%

4. ปริมาณออกซิเจน เนื่องจากออกซิเจนเป็นตัวปฏิกิริยายับยั้ง ดังนั้น ถ้ามีอยู่ในเรซินปริมาณมาก เช่น การกวนมากๆ จะทำให้การแข็งตัวช้าลง

ขณะที่พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเกิดการแข็งตัว จะมีการหดตัว (shrinkage) โดยปริมาตรประมาณ 6-8 %

2.2.3 สมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว เป็นพลาสติกที่มีสมบัติเหมาะสมทั้งทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และทางเคมี คือมีความแข็ง ความใส ความเงา และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า และทนการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี

นิยม ใช้ทำวัสดุเชิงประกอบโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (glass fiber) และเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ว่า ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส หรือเอฟ.อาร์.พี. (Fiber-reinforced plastics, F.R.P.) ซึ่งมีสมบัติเบา เหนียว และแข็งแรง โดยเมื่อเทียบความแข็งแรงต่อน้ำหนักพบว่า ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสมีความแข็งแรงมากกว่า

2.2.4 การใช้งาน

ด้วยสมบัติที่ดีหลายประการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้มีการนำพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีลักษณะการใช้งานที่สำคัญแบ่งเป็น 3 ด้าน ดังนี้

การหล่อ (casting) เช่น ผลิตภัณฑ์พลาสติกหล่อชนิดต่างๆ ได้แก่ การหล่อกระจกเทียม หล่อพระ หล่อหินอ่อนเทียม หล่ออุปกรณ์ไฟฟ้า กระดุม และอื่นๆ

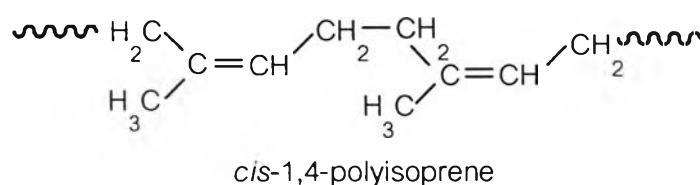
การลามิเนตหรือการเคลือบ (laminates) เช่น ผลิตภัณฑ์เคลือบรูปวิทยาศาสตร์ การเคลือบหน้าไม้อัด และอื่นๆ

การขึ้นรูปด้วยแม่แบบ (molding) ส่วนใหญ่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส เช่น การทำถังขนาดใหญ่ ส่วนประกอบของเครื่องบิน ตัวถังรถยนต์ ชั้นวางของ เรือ อ่างอาบน้ำ และอื่นๆ

โดยทั่วไปแล้ว 80% ของพอลิเอสเตอร์เรซินทั้งหมดจะถูกใช้ทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส ส่วนที่เหลือใช้งานด้านพลาสติกหล่อ การลามิเนต และอื่นๆ

2.3 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [3]

ยางธรรมชาติ คือ *cis*-1,4-polyisoprene โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากต้นยางพารา ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea Brasiliensis* บางครั้งจึงเรียกว่า "ยางฮีเวีย" (*Hevea rubber*) ต้นยางพาราเป็นต้นไม้ยืนต้น สูงใหญ่ อายุยืน มีมากมายหลายพันธุ์ ซึ่งให้องค์ประกอบของน้ำยางที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (*cis*-1,4-polyisoprene) [3]

2.3.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex)

น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพาราเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม เป็นสารแขวนลอย หรือ คอลลอยด์ (colloids) โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก เรียกว่า "เซรัม" (serum) และมีอนุภาคยาง พอลิไอโซพรีนประมาณ 30-45% ขนาด 20-2,000 นาโนเมตร (nm) ลอยตัวแขวนลอยกระจายอยู่ในลักษณะที่เป็นไมเซลล์ (micelles) นอกจากนี้ ยังประกอบด้วยสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber substances) ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารอนินทรีย์อื่นๆ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก สังกะสี ทองแดง และแมงกานีส เป็นต้น ส่วนประกอบต่างๆ ของน้ำยางแสดงในตารางที่ 2.2 น้ำยางธรรมชาติมี pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนาแน่นประมาณ 0.97-0.98 g/cm³ และมีความหนืด (viscosity) ไม่แน่นอน

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆ ในน้ำยางธรรมชาติ [3]

| ส่วนประกอบ | ปริมาณ (%) |
|--|------------|
| เนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) – พอลิไอโซพรีน | 33 |
| โปรตีน | 1.4 |
| คาร์โบไฮเดรต | 1.6 |
| ไขมัน | 1.0 |
| ไกลโคไลปิด (glycolipids) และฟอสโฟไลปิด (phospholipids) | 0.6 |
| สารอนินทรีย์ | 0.5 |
| อื่นๆ | 0.4 |
| น้ำ | 58.5 |

ความหนืด ปริมาณเนื้อยางแห้งของน้ำยาง และสารต่างๆ ในน้ำยางจะแตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุต้นยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง เป็นต้น ตัวอย่างเช่นการกรีดยางในฤดูฝน จะได้น้ำยางที่มีเนื้อยางแห้งปริมาณน้อยแต่น้ำปริมาณมาก เมื่อกรีดยางใหม่ๆ จะมีอัตราการไหลของน้ำยางสูงสุด และจะค่อยๆ ลดลงในอัตราคงที่ จนกระทั่งหยุดไหล การหยุดไหลของน้ำยางหลังกรีดยางเนื่องมาจากการแข็งตัวเป็นก้อนยาง (coagulum) อุดตันท่อน้ำยางที่ถูกตัดขาด

การที่น้ำยางมีสถานะเป็นของเหลวแขวนลอยได้ เนื่องจากอนุภาคยางถูกห่อหุ้มด้วยชั้นโปรตีนซึ่งมีประจุลบ (negative charges) ชั้นโปรตีนจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แต่ละอนุภาคยาง

รวมตัวกันเป็นก้อนยางแข็งตกตะกอน เนื่องจากประจุลบที่ล้อมรอบอนุภาคยางจะผลักกันทำให้อนุภาคยางไม่จับตัวรวมกันเป็นก้อน ยังสามารถลอยตัวกระจายอยู่ในตัวกลางน้ำได้

เมื่อน้ำยางไหลออกจากต้นยางไม่กี่ชั่วโมงก็เกิดการตกตะกอนเสียสภาพ ระยะเวลาการตกตะกอนขึ้นกับอุณหภูมิแวดล้อมและเสถียรภาพของน้ำยาง โดยจะเกิดการจับตัวเป็นก้อนแยกส่วนกับเซลลูโลส และในที่สุดจะเกิดการเน่าเสีย (putrefaction) ให้กลิ่นเหม็น ดังนั้น ชาวสวนยางต้องทำการใส่ “สารรักษาสภาพน้ำยาง” (preservatives) เพื่อป้องกันการเสียสภาพของน้ำยาง

การเสียสภาพของน้ำยางสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การตกตะกอนตามธรรมชาติ (natural coagulation หรือ spontaneous coagulation) เมื่อน้ำยางไหลออกจากต้นยาง จะมีจุลินทรีย์ (micro-organisms) เช่น แบคทีเรียในอากาศและในสิ่งแวดล้อมปะปนอยู่ในน้ำยาง เมื่อเวลาผ่านไปจุลินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ไม่ใช่ยาง เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และน้ำตาล เกิดเป็นกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acid, VFA) เช่น กรดฟอร์มิก และกรดแอสติติก เป็นต้น ภาวะความเป็นกรด (acidity) จะทำลายชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยางที่มีประจุลบ เป็นผลให้อนุภาคยางเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนแข็งขนาดเล็ก ที่ชาวบ้านเรียกว่า “เม็ดพริก” ซึ่งจะมีขนาดก้อนยางแข็งและปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ รวมทั้งมีกลิ่นเหม็นบูดอันเนื่องจากการสลายตัวของโปรตีน

สาเหตุที่คาดว่าเป็นอีกกลไกหนึ่งของการเสียสภาพของน้ำยางธรรมชาติ คือ การไฮโดรลิซิส (hydrolysis) สารประเภทไขมัน (lipid) ซึ่งมีประมาณ 1-2% ในน้ำยาง เกิดเป็นกรดไขมันที่มีประจุลบ (fatty acid anions) สามารถแทนที่โปรตีนที่ห่อหุ้มก้อนอนุภาคยางซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน ประจุลบของกรดไขมันเหล่านี้อาจทำปฏิกิริยากับประจุบวกของโลหะ เช่น แคลเซียม (calcium, Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (magnesium, Mg^{2+}) เกิดเป็นตะกอนแข็งของเกลือของกรดไขมันกับโลหะที่ไม่ละลายน้ำ แยกสถานะในที่สุด ไอออนของโลหะเหล่านี้อาจมีอยู่ในน้ำยางอยู่แล้ว หรืออาจเกิดขึ้นภายหลังจากการย่อยของเอนไซม์ (enzymes) ในน้ำยาง เช่น เอนไซม์ไลเปส (lipases)

2. การแข็งตัวเนื่องจากกรด (acid coagulation) เนื่องจากการจับตัวเป็นก้อนตามธรรมชาติของยางใช้เวลานาน (> 36 ชั่วโมง) และมีกลิ่นเหม็น ดังนั้น ในการผลิตยางแห้ง เช่น ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง ฯลฯ จึงมีการใช้สารตกตะกอน ได้แก่ สารช่วยให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนแข็ง หรือโคแอกคูแลนต์ (coagulant) ในกรณีของน้ำยางธรรมชาติจะนิยมใช้กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดซัลฟูริกเจือจาง (ประมาณ 2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) เมื่อใส่กรดเจือจาง

ในน้ำยาง กรดจะแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออนที่มีประจุบวก และเข้าทำปฏิกิริยากับ คาร์บอกซิเลทไอออน ($R-CO_2^-$) ที่อยู่รอบๆ อนุภาคยางเกิดเป็นกรดไขมัน (RCO_2H) ที่ไม่ละลายน้ำรอบอนุภาคยาง เป็นผลให้แรงผลักระหว่างอนุภาคยางอันเนื่องมาจากประจุลบลดลงและหายไปที่สุดในเมื่อชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางถูกทำลาย อนุภาคยางจึงจับตัวเป็นก้อนยางแข็งอย่างรวดเร็ว

ปัจจุบันชาวสวนยางนิยมใช้กรดมดหรือกรดฟอร์มิกเป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางแห้ง เนื่องจากมีราคาถูกและให้ยางแห้งที่มีสมบัติต่างๆ ดี กรดอะซิติกนิยมใช้ในการผลิตยางเครพสีจาง (pale crepe) ส่วนกรดซัลฟูริกสามารถใช้ในการจับตัวของยางน้ำยาง (skim latex) และนิยมใช้กับยางชนิดพิเศษบางชนิดเท่านั้น

เพื่อป้องกันการเสียหายของน้ำยางชาวสวนต้องใส่สารรักษาสภาพน้ำยางซึ่งมีหน้าที่

- ทำลาย กีดขวาง หรือชะงักการทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ เช่น แบคทีเรียและเอนไซม์ ที่จะทำให้น้ำยางเสียหาย
- เพิ่มเสถียรภาพการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยาง โดยการเพิ่มประจุลบของอนุภาคยาง และเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของอนุภาคยาง-น้ำ (rubber-water interface) ทำให้สามารถลอยตัวกระจัดกระจาย ไม่รวมตัวเป็นก้อนแข็งแยกสถานะ สารรักษาสภาพน้ำยางควรมีสมบัติเป็นด่าง เนื่องจากชั้นโปรตีนหุ้มอนุภาคยางมีประจุลบ และมีสมบัติเป็นด่าง ดังนั้น สารรักษาสภาพน้ำยางควรเพิ่ม pH หรือเพิ่มความเป็นด่างให้กับน้ำยาง
- ช่วยป้องกันหรือยับยั้งปฏิกิริยาของอนุมูลโลหะ โดยเฉพาะไอออนของโลหะหนักที่ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตะกอนเกลือของโลหะที่ไม่ละลายน้ำ เช่น แคลเซียม และแมกนีเซียม อนุมูลของโลหะยังเป็นตัวช่วยในการเจริญเติบโตและอยู่ได้ของจุลินทรีย์ อันเป็นสาเหตุสำคัญของการเสียหายของน้ำยาง

สารรักษาสภาพน้ำยางที่สำคัญ ได้แก่ แอมโมเนีย (ammonia) โซเดียมซัลไฟต์ (sodium sulphite, Na_2SO_3) และฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) เป็นต้น

แอมโมเนีย เป็นสารที่ใช้รักษาสภาพน้ำยางมาเป็นเวลานาน น้ำยางสดจากสวน จะได้รับการเติมสารละลายแอมโมเนีย (เจือจางประมาณ 25%) ลงไป 0.03-0.06% ของน้ำหนักยาง ขึ้นกับระยะเวลาและระยะทางจากสวนมายังโรงงานแปรรูปยาง ซึ่งป้องกันการจับตัวของน้ำยางได้ 5-11 ชั่วโมง ถ้าต้องการให้นานกว่านี้อาจเพิ่มปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางได้ถึง 0.35% แอมโมเนียที่เติมลงไปนอกจากช่วยรักษาสภาพน้ำยางแล้ว ยังช่วยลดชะงักการเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์ในน้ำยางอีกด้วย

โซเดียมซัลไฟด์ เป็นสารที่ช่วยรักษาสภาพน้ำยางในช่วงระยะเวลาสั้น โดยเติมสารละลายลงในถ้วยรองน้ำยางหรือถังรวบรวมน้ำยาง ในปริมาณ 0.05% ต่อน้ำหนักยาง และเติมในรูปของสารละลายเข้มข้น 3% โดยหยดลงไปถ้วยรองน้ำยาง 2-3 หยด แล้วเติมส่วนที่เหลือลงในถังรวบรวมน้ำยาง

สารรักษาสภาพน้ำยางที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- ต้องไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และต้นยางพารา
- ไม่เปลี่ยนสีน้ำยางหรือให้กลิ่นรุนแรง
- ไม่เกิดปฏิกิริยาขัดขวางหรือมีผลใดๆ ต่อกระบวนการแปรรูปยาง
- ควรมีราคาถูกและอยู่ในรูปที่ใช้งานง่าย

การเลือกใช้สารรักษาสภาพน้ำยางขึ้นกับลักษณะของยางที่ต้องการผลิตเป็นหลัก เช่น ยางแท่ง (ยางแผ่น ยางเครพ หรือยางแท่ง) หรือน้ำยางข้น ปริมาณการใช้ขึ้นกับระยะเวลาของการเก็บรักษาน้ำยางก่อนการแปรรูป บางครั้งอาจเรียกสารรักษาสภาพน้ำยางระยะสั้นว่า “แอนติโคแอกกูแลนท์” (anticoagulants)

2.3.2 การแปรรูปยางธรรมชาติ

ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติ จะต้องแปรรูปน้ำยางดิบให้อยู่ในรูปอื่นเพื่อความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการเก็บรักษา ได้แก่ ยางแท่ง และน้ำยางข้น เป็นต้น

การผลิตยางแท่ง

ยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (air-dried sheet, ADS) ยางแท่ง (block rubber) ยางเครพ (crepe rubber) เป็นต้น ยางที่ใช้ผลิตส่วนมาก (ประมาณ 80-85%) ได้จากน้ำยางสดจากสวนยาง (field latex) และอีก 15-20% เป็นเศษยางแท่งที่แข็งตัวตามธรรมชาติที่เรียกว่า “ซียาง” เช่น เศษยางแท่งก้นถ้วยยาง (cup lumps) เศษยางติดเปลือกไม้ (bark scrap) เศษยางแท่งติดรอยกรีด (tree lace) และเศษยางบนพื้นดิน (earth scrap) เป็นต้น

การผลิตน้ำยางข้น

น้ำยางสดมีเนื้อยางแห้ง 30-45% หรือเฉลี่ยประมาณ 35% เป็นน้ำ 65% ดังนั้น จึงต้องผลิตน้ำยางข้นให้มีเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ซึ่งมีข้อดี ดังนี้

- สะดวกและลดต้นทุนในการขนย้ายน้ำยางจากสวนยางไปยังโรงงานผลิต
- น้ำยางข้นให้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพและความสม่ำเสมอดีกว่าน้ำยางสด
- การใช้น้ำยางข้นจะสะดวก และง่ายในการควบคุมกระบวนการผลิต เช่น กระบวนการจุ่มแม่แบบ (dipping process) ในการผลิตลูกโป่ง และถุงมือยาง กระบวนการผลิตโฟมยาง (foam process) ในการผลิตที่นอนยาง และกระบวนการเคลือบยาง (coating process) ในการผลิตผ้าใบฉาบยาง

น้ำยางข้นสามารถผลิตได้ 4 วิธีหลักคือ

วิธีระเหยน้ำ (evaporation) เป็นวิธีการทำให้น้ำส่วนหนึ่งในน้ำยางระเหยออกไป โดยการให้ความร้อนแก่น้ำยางในภาชนะ เช่น ถังหมุน โดยมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizers) เช่น potassium soap ลงในน้ำยางสดก่อนให้ความร้อน น้ำยางข้นที่ได้โดยวิธีนี้มีเสถียรภาพดีมาก เหมาะสำหรับการขนส่งน้ำยางข้นระยะทางไกล และการใช้งานที่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อ (filler) ปริมาณมาก เช่น การผลิตกาวลาเท็กซ์

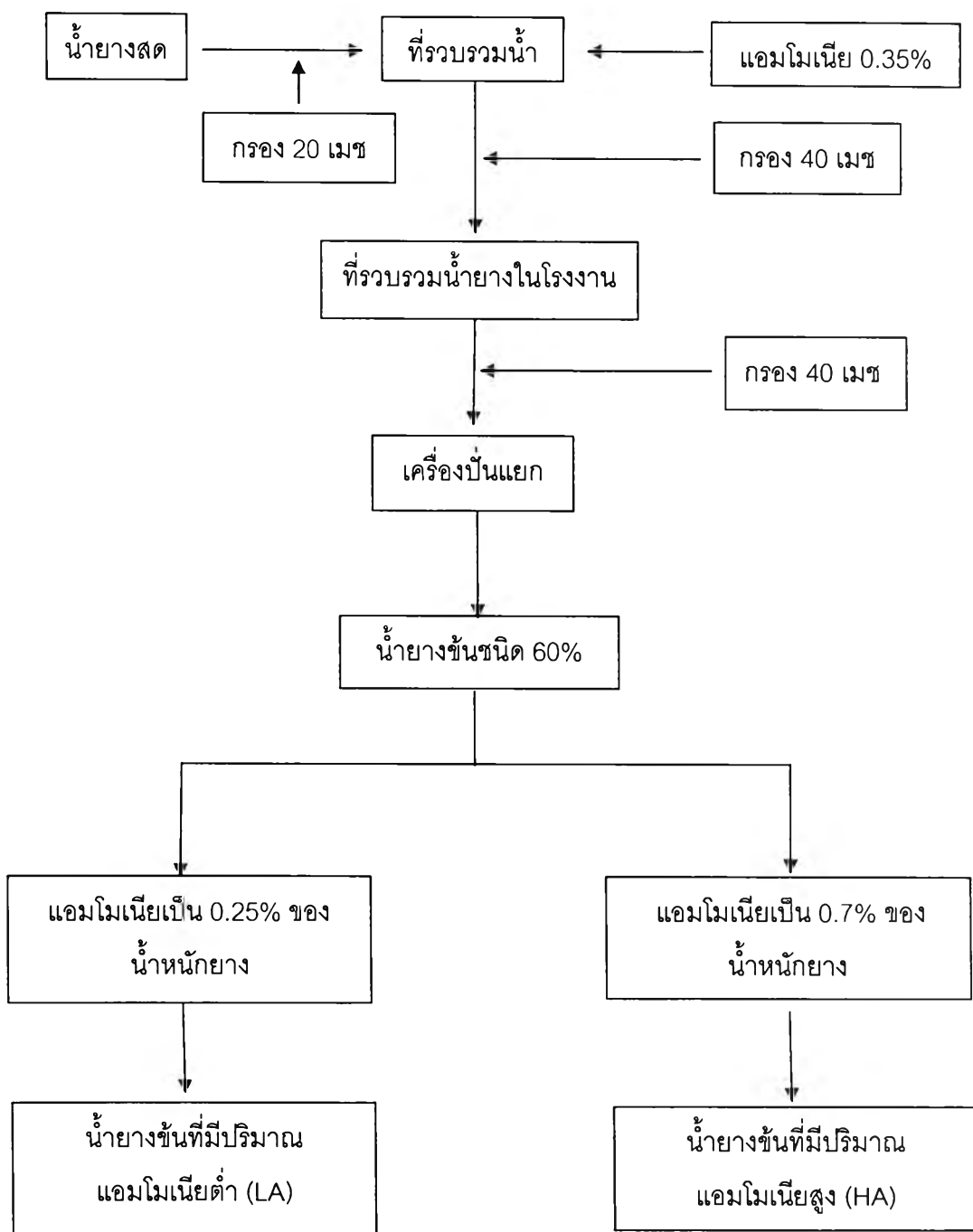
วิธีทำให้เกิดครีม (creaming) อนุภาคยางสามารถเคลื่อนที่แบบอิสระในทุกทิศทางอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่มีทิศทางที่แน่นอน หรือมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) และแขวนลอยอย่างอิสระเป็นสารละลายอิมัลชันแบบคอลลอยด์ในตัวกลางที่เป็นน้ำ การผลิตน้ำยางข้นวิธีนี้ทำโดยการเติมสารเคมี คือ สารทำให้เกิดครีม (creaming agent) เช่น โซเดียมอัลจิเนต (sodium alginate) ทำให้อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลให้อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางน้ำเคลื่อนที่ช้าลง จนกระทั่งรวมตัวลอยสู่ผิวหน้าคล้ายการเกิดครีม เป็นผลให้บริเวณส่วนบนของน้ำยางมีความเข้มข้นของเนื้อยางสูง การผลิตวิธีนี้มีความยุ่งยากและใช้เวลานาน จึงไม่เป็นที่นิยม

วิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงหรือเซนตริฟิวจ์ (centrifuging) [4] เป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยการหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกยางซึ่งเบากว่า (มีความถ่วงจำเพาะ 0.92) ออกจากของเหลวที่หนักกว่า (มีความถ่วงจำเพาะ 1.02) โดยน้ำยางสดที่ใส่แอมโมเนียมาแล้ว จะไหลผ่านท่อเข้าไปในถ้วยปั่นแยก และถูกเหวี่ยงด้วยความเร็ว 7,000 – 8,000 รอบ/นาที ยางจะถูกเหวี่ยงขึ้นข้างบน และไหลออกทางช่องตอนบนของเครื่อง ส่วนนี้เรียกว่า "น้ำยางข้น" ของเหลวที่เหลือรวมทั้งของแข็งที่ไม่ใช่ยาง จะถูกแยกออกทางช่องด้านล่าง ของเหลวส่วนนี้เรียกว่า "หางน้ำยาง" (skim latex) โดยวิธีนี้ น้ำยางจะถูกแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง เป็นน้ำยางข้นที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 61.5 % และเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง 60 % อีกส่วนหนึ่งเป็นหางน้ำยางที่มียางแห้งปนอยู่ราว 3-5 % ส่วนประกอบของเครื่องหมุนเหวี่ยงจะสัมผัสกับน้ำยางโดยตรง จึงต้องทนต่อการกัด

กร่อนของแอมโมเนีย ควรทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ไม่ควรใช้โลหะทองแดง ทองเหลือง ทองสัมฤทธิ์ และแมงกานีส เพราะมีผลทำให้น้ำยางเสื่อมคุณภาพเร็วขึ้น

น้ำยางชั้นซึ่งใช้แอมโมเนียในการรักษาสภาพเพียงอย่างเดียว จะต้องใช้ปริมาณสูงถึง 0.7 % น้ำยางชั้นชนิดนี้เรียกว่า "HA latex" (high ammonia latex) ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียเล็กน้อยประมาณ 0.2 % ร่วมกับสารอื่น เช่น ZnO / TMTD (zinc oxide / tetramethylthiuram disulfide) 0.02 % หรือกรดบอริก 0.2 % หรือแซนโตไบรต์ (santobrite) 0.2 % เรียกว่า "LA latex" (low ammonia latex)

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางชั้น ต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำให้น้ำระเหยออกไปได้ง่าย ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่บางและมีรูพรุน เช่น ลูกโป่ง ถุงมือ ยางยืด จุกนม ตึกตา ที่นอนฟองน้ำ กาว และฟองน้ำรองใต้พรม เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนการผลิตแสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การผลิตน้ำยางชั้นชนิด 60% [3]

น้ำยางชั้นที่ผลิตด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้ายังจำแนกออกเป็น 4 ชนิด ตามระบบรักษาสภาพน้ำยางที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 น้ำยางชั้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้า [3]

| ชื่อเต็ม | ชื่อย่อ | ส่วนแบ่งทางการค้า (%) | ระบบรักษาสภาพน้ำยาง (%โดยน้ำหนัก) |
|-----------------------------------|---------|-----------------------|---|
| High or Full Ammonia | HA | 66 | 0.7% แอมโมเนีย |
| Low Ammonia | LA-TZ | 17 | 0.2% แอมโมเนีย, 0.025% ซิงก์ออกไซด์ 0.025% เดตระเมทิลไทยแรมโดซัลไฟด์ 0.2% แอมโมเนีย |
| Low Ammonia Pentachlorophenate | LA-SPP | 6 | 0.2% โซเดียมเพนตะคลอโรไฟเนต 0.2% แอมโมเนีย |
| Low Ammonia Boric Acid | LA-BA | 5 | 0.24% กรดบอริก |

วิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้า (electrodecantation) วิธีแยกน้ำยางด้วยกระแสไฟฟ้า ทำโดยผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในน้ำยาง ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นภายในเซลล์ อนุภาคของยางจะเคลื่อนที่เข้าหาจากที่เป็นขั้วบวกซึ่งอยู่ใกล้ที่สุด ทำให้อนุภาคยางอยู่รวมกันอย่างหนาแน่นจนเกิดเป็นน้ำยางชั้นขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถลอยตัวขึ้นสู่ข้างบน ซึ่งสามารถช้อนน้ำยางชั้นส่วนนี้ออกจากถังได้ วิธีนี้จะได้น้ำยางชั้นที่มี %total solid content (%TSC) 62-62% และ %Dry rubber content (%DRC) 60% หลังจากนั้นก็เก็บรักษาโดยเติมแอมโมเนีย 0.7% ของน้ำหนักยาง

2.3.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [4]

เนื้อยางแห้งประกอบด้วยส่วนที่เป็นยางประมาณ 92% และสารที่ไม่ใช่ยางประมาณ 8% ซึ่งได้แก่ โปรตีน กลูโคไซด์ ลิพิด เกลือแร่ และเอนไซม์ (enzymes) สารที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้แม้มีเพียงเล็กน้อยแต่มีผลต่อการวัลคาไนซ์ยาง และสมบัติของยางเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ น้ำยางที่ได้จากต้นยางจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล สภาพดินฟ้าอากาศ ชนิดของดิน สภาพแวดล้อมของแปลงปลูกยาง พันธุ์ยาง การกรีต ความยาวของรอยกรีต อายุต้นยาง ความถี่ของการกรีต ช่วงเวลาของการกรีตยาง การใช้สารเคมีเร่งน้ำยาง และปัจจัยอื่นๆ (เช่น การทำความสะอาดถังใส่น้ำยาง การกรีตยางในฤดูฝน ซึ่งจะมีน้ำฝนหลงเหลือในถ้วยยาง เป็นต้น)

เนื่องจากโมเลกุลของยางไม่อิ่มตัว และมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสีย : ข้อดี คือ พันธะคู่ และหมู่แอลฟาเมทิลีน (α -methylene group) ในพอลิไอโซพรีนจะว่องไวต่อการถูกวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ส่วนข้อเสีย คือ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนและโอโซน เมื่อทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน ดังนั้น จึงต้องใส่ สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) และ สารแอนติโอโซนแนนท์ (antiozonant) เข้าไปอย่างเพื่อยืดอายุการใช้งานหรือการเก็บรักษา

ยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว จึงสามารถทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดส์ เช่น เปอร์ออกไซด์ กรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate) โอโซน คลอรีน และอื่นๆ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้เป็นยางไฮโดรจิเนเตด (hydrogenated rubber) กับคลอรีนได้เป็นยางคลอริเนเตด (chlorinated rubber) กับไฮโดรเจนคลอไรด์ได้เป็นยางไฮโดรคลอริเนเตด (hydrochlorinated rubber) และเกิดปฏิกิริยาไซโคลเซชัน (cyclization reaction) ได้ยางไซโคลซ์ (cyclized rubber)

สมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของยางธรรมชาติ อาจเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อยจากการมีสารที่ไม่ใช่ยางปะปนอยู่ และจากระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity) ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้ และมีผลทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนจาก 0.92 เป็นประมาณ 0.95 กรัม/มิลลิลิตร ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพบางอย่างโดยเฉลี่ยของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพบางอย่างของยางธรรมชาติ[4]

| | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Specific gravity (20°C) | 0.934 |
| Refractive index (20°C) | 1.5215 - 1.5238 |
| Coefficient of cubical expansion | 0.00062/°C |
| Specific heat (20°C) | 0.502 |
| Cohesive energy density | 63.7 cal / cc |
| Heat of combustion at constant volume | 44.16 kJ / g / g |
| Thermal conductivity | 10,700 cal / g |
| Dielectric constant | 2.37 |
| Power factor (1,000 cycles) | 0.15 – 0.2 |
| Volume resistivity | 10 ¹⁵ ohms / cc |
| Dielectric strength | 1,000 volts / mil |

เมื่อยางธรรมชาติถูกทำให้เย็นจาก 10 ถึง -35 องศาเซลเซียส อย่างช้าๆ จะทำให้ยางทึบแสง และสูญเสียความยืดหยุ่นเนื่องจากมีผลึกเกิดขึ้นบางส่วน และถ้าดึงยางธรรมชาติให้ยืดออกมากกว่า 80% ของความยาวเดิม ก็จะสามารถเกิดผลึกได้เช่นกัน เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่เมื่อเกิดความเครียด (strain crystallization) การเกิดผลึกจะทำให้แรงดึงดูระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ ดังนั้น ความทนแรงดึงในแนวที่ถูกดึงจะสูงกว่าในแนวตั้งฉาก ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงของยางดิบ (green strength) สูงขึ้น

2.3.4 กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติ (Graft Copolymer of NR) [5],[6]

การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ต้องทำให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาบนโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงจะสามารถเกิดการโคพอลิเมอร์ไรซ์ได้ วิธีที่ใช้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ได้จากวิธีเรดิคัลพอลิเมอร์ไรเซชัน (radical polymerization) ซึ่งจะเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ขึ้นกับว่า พอลิเมอร์ที่ถูกกราฟต์สามารถละลายในมอนอเมอร์ที่มากกราฟต์ได้หรือไม่

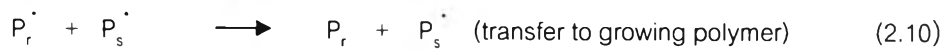
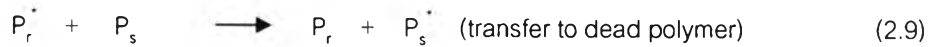
การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติ จะเปลี่ยนยางให้เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer, TPE) ซึ่งวิธีเตรียมมีหลายวิธี ดังนี้

- ด้วยกลไกการถ่ายโอน (transfer mechanisms)
- การกราฟต์ผ่านตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัวในยางธรรมชาติ (graft copolymerization via the unsaturation in natural rubber)
- พอลิเมอร์ไรเซชันแบบรีดอกซ์ (redox polymerization)
- การเตรียมด้วยกระบวนการโฟโตเคมีคัล (photochemical synthesis)
- เทคนิคการฉายรังสีพลังงานสูง (high energy irradiation techniques)

การถ่ายโอนเรดิคัล

ในระหว่างการสังเคราะห์พอลิเมอร์อาจมีการถ่ายโอนเรดิคัลจากพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด ($P_r \cdot$) ให้กับสารเริ่มปฏิกิริยา มอนอเมอร์ สารถ่ายโอนสายโซ่ (chain transfer agent) ตัวทำละลายพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด ดังสมการที่ 2.5-2.10





ในแต่ละกลไกจะมีการถ่ายโอนอะตอมของไฮโดรเจนไปยังสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดบนพอลิเมอร์สิ้นสุดลง ซึ่งกลไกในสมการที่ 2.9 เป็นกลไกที่จำเป็นสำหรับการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์

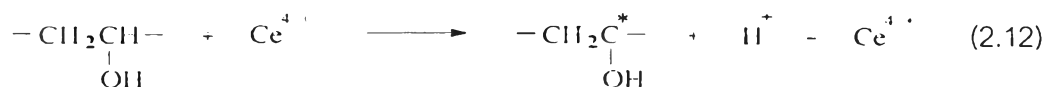
การกราฟต์ผ่านตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัวในยางธรรมชาติ

เป็นการเข้าทำปฏิกิริยาของสายโซ่พอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาดที่ตำแหน่งไม่อิ่มตัว หรือที่พันธะคู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ ดังแสดงในสมการที่ 2.11



พอลิเมอไรเซชันแบบรีดอกซ์

เป็นวิธีเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดกับพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเซลลูโลส เป็นต้น ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้ซิริกไอออน (civic ion) หรือตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดเรดิคัลอิสระบนพอลิเมอร์ ดังแสดงในสมการที่ 2.12 ซึ่งวิธีนี้จะไม่เกิดโพลิเมอร์ในระบอบเพราะมอนอเมอร์ไม่ว่องไวต่อซิริกไอออน



การเตรียมด้วยกระบวนการโฟโตเคมีคัล

สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเหมาะสมจะสามารถดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงที่มองเห็นได้ (visible light) และอัลตราไวโอเล็ต ทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์กับสารโมเลกุลใหญ่ที่มีหมู่ที่ว่องไวต่อแสงได้ อย่างไรก็ตาม มีพอลิเมอร์เพียงไม่กี่ชนิดที่จะกระตุ้นด้วยแสงได้โดยตรง และถ้าพลังงานของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นมากเกินไปอาจทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออก และถ้าในระบบมีมอนอเมอร์อยู่ด้วย จะมีผลทำให้เกิดโคพอลิเมอร์แบบบล็อกร แต่ถ้าหมู่ด้านข้าง (side group) ถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์แทน

เทคนิคการฉายรังสีพลังงานสูง

เมื่อพอลิเมอร์ได้รับการฉายรังสีพลังงานสูงจะเกิดผลกระทบ 2 ประการ คือ เกิดการสูญเสียหมู่ที่อยู่ด้านข้าง เช่น ไฮโดรเจนอะตอมจากสายโซ่พอลิเมอร์ และสายโซ่หลักขาดออก ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้ แรดิคัลของพอลิเมอร์อื่นสามารถรวมตัวกับพอลิเมอร์ที่ถูกฉายรังสีแล้วเกิดเป็นกราฟต์โคพอลิเมอร์ และบล็อกโคพอลิเมอร์ได้ตามลำดับ เช่น *cis*-1,4-poly(isoprene-*g*-methyl methacrylate) สังเคราะห์โดยฉายรังสี Co^{60} ให้กับน้ำยางธรรมชาติที่ผสมเมทิลเมทาคริเลต ทำให้มีประสิทธิภาพของการกราฟต์ (grafting efficiency) สูง และในระบบจะปราศจากไฮโมพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต

2.4 ถ้ำแกลบ (Rice Husk Ash) [7,8,9]

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตข้าวเป็นอันดับหนึ่งของโลก การให้ได้มาซึ่งข้าวสารที่ใช้ในการบริโภคและการส่งออกนั้น ต้องผ่านกระบวนการขัดสีเพื่อกำจัดเปลือกข้าวหรือที่เราเรียกกันว่า “แกลบ” ออกจากเมล็ดข้าว ดังนั้นในปีหนึ่งๆ แกลบข้าวซึ่งถือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการการสีข้าวจะมีปริมาณมากคิดเป็น 25% ของปริมาณข้าวเปลือก โดยข้าวเปลือก 1 ตัน จะให้แกลบประมาณ 200 กิโลกรัม เมื่อนำไปเผาเปิดจะได้ถ้ำแกลบประมาณ 40 กิโลกรัมหรือ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแกลบ ถ้ำแกลบที่ได้บางส่วนมีการส่งออกในราคากิโลกรัมละ 3-4 บาท รวมค่าระวางเรือและการขนส่งแล้ว ประเทศที่รับซื้อถ้ำแกลบรายใหญ่คือประเทศเยอรมัน รองลงมาคือ เกาหลี ปริมาณและมูลค่าการส่งออกได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 2.5 แสดงข้อมูลทางสถิติการส่งออกถ้ำแกลบตั้งแต่ปี 2539-2542 [7]

| พ.ศ. | ปริมาณถ้ำแกลบ (กิโลกรัม / ปี) | มูลค่าถ้ำแกลบ (บาท / กิโลกรัม) |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 2539 | 2,800,063 | 4.03 |
| 2540 | 28,349,828 | 4.73 |
| 2541 | 25,969,809 | 5.38 |
| 2542 (ม.ค. – ส.ค.) | 16,230,174 | 4.58 |
| เฉลี่ย | 19,039,900 | 4.71 |

ที่มา : รายงานสถิติข้อมูลนำเข้า-ส่งออก กรมศุลกากร

2.4.1 ประโยชน์ของแกลบ

แกลบถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ใช้ผสมดินเหนียวสำหรับทำอิฐเผา ใช้ทำฉนวนกันความร้อน อาหารสัตว์ ใช้ผสมในดินเป็นปุ๋ยช่วยในการเจริญเติบโตของต้นไม้ ในโรงสีบางโรงสีนำแกลบไปใช้ประโยชน์โดยการเผาเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้นในโรงงาน นับว่าเป็นการช่วยประหยัดพลังงานและต้นทุนในการผลิตอีกทางหนึ่งด้วย จากการค้นคว้าของนักวิจัยหลายท่าน ทำให้ทราบว่าแกลบเป็นแหล่งของซิลิกา โดยถ้าแกลบมีสารซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่ถึงร้อยละ 95 นับว่าเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์เป็นอย่างมาก เนื่องจากซิลิกาสามารถนำมาผลิตวัสดุสมัยใหม่เพราะว่าถ้าแกลบมีสมบัติพิเศษหลายประการ เช่น โครงสร้างขนาดละเอียดมาก , ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง เป็นต้น ในปัจจุบันได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายแขนง ได้แก่ อุตสาหกรรมยา ใช้เป็นสารช่วยเพิ่มแรงดึงผิว ช่วยในการกระจายตัวของยาชนิดที่เป็นของเหลว อุตสาหกรรมน้ำมันและปิโตรเคมี ใช้เป็นสารช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยา หรือใช้เป็นตัวเร่งสารช่วยเร่งปฏิกิริยา อุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็นตัวดูดซับความชื้น ช่วยยืดอายุการถนอมอาหาร เป็นต้น และในด้านสิ่งแวดล้อม ใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีอันตราย ใช้กรองน้ำดื่ม ดักจับอากาศที่มีสารพิษหรือฝุ่นละอองขนาดเล็ก

ถ้าแกลบที่ถูกส่งไปขายในราคา กิโลกรัมละ 3-4 บาทนั้น ถ้านำมาผ่านกระบวนการทางเคมี หรือโดยการเผาจะได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น และมีมูลค่าเพิ่มถึง 5 เท่าตัว เป็นอย่างน้อย ดังนั้นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ จะเป็นแนวทางสำหรับการผลิตซิลิกาจากแกลบในระดับอุตสาหกรรมได้ ซึ่งสามารถทำการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้จริง ก็จะเป็นการลดปริมาณการนำเข้าซิลิกาบริสุทธิ์จากต่างประเทศ และจากซิลิกาที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐเผา , silica gel , synthetic acid , silicon เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ผลิตได้นี้มีมูลค่าสูงกว่าแกลบหลายเท่าตัว

จากผลการวิจัยเกี่ยวกับแกลบข้าวนั้น พบว่าแกลบข้าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมาย เช่น ใช้ผสมอาหารสัตว์ ใช้ทำปุ๋ย ใช้เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น ด้วยประโยชน์ที่มีมากมายของแกลบ จึงมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของแกลบข้าว พบว่าแกลบข้าวประกอบด้วยความชื้น แกลบ(ส่วนใหญ่เป็นซิลิกา) ลิกนิน เซลลูโลส เพนโตซาน โปรตีน และไวนามีน สารประกอบเหล่านี้อยู่บนรูปอินทรีย์สารมีประมาณร้อยละ 72 ของแกลบข้าวโดยน้ำหนัก ซึ่งความแตกต่างขององค์ประกอบต่างๆ ในแกลบข้าวขึ้นอยู่กับเงื่อนไข การเพาะปลูก ปัจจัยทางภูมิศาสตร์ ปิเพาะปลูก การเตรียมตัวอย่าง และวิธีวิเคราะห์ปริมาณความชื้นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศที่ล้อมรอบ จากการสำรวจแกลบข้าวจากแหล่งต่างๆ ทั่วโลกสามารถสรุปองค์ประกอบต่างๆ เป็นค่าเฉลี่ยไว้ดังนี้ แกลบ 20% (ในแกลบมีซิลิกาประมาณ 95%) ลิกนิน 22% เซลลูโลส 38% เพนโตซาน

18% และอินทรีย์สารอื่นๆ 2% ปริมาณความชื้นในอากาศประมาณ 50% (V.M.H Govindarao, 1980)

ปี ค.ศ. 1986 เจมส์ และ ราวน์ (James and Rao) ทำการศึกษาซิลิกาในแกลบและสรุปว่า ลักษณะทางกายภาพและความว่องไวทางเคมีของซิลิกาในแกลบ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา เมื่อศึกษาเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของแกลบ ปรากฏพีคกว้างที่ 2θ ประมาณ 22° แสดงว่าแกลบมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดผลึก (crystallization) จะไม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700°C พื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิกาที่ได้จากแกลบที่ชะด้วยกรดมีค่า 95 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเวลา soaking ที่ค่ามากๆ ปริมาตรรูพรุนซึ่งมีรัศมีน้อยกว่า 10 นาโนเมตร จะลดลง

2.4.2 องค์ประกอบของแกลบ

จากผลการวิเคราะห์ของนักวิจัยที่ทำมาแล้ว [10] พบว่าองค์ประกอบหลักของแกลบ คือ สารอินทรีย์พวกเซลลูโลส, ลิกนิน, น้ำตาล ฯลฯ แสดงในตารางที่ 2.6 แต่ปริมาณขององค์ประกอบไม่แน่นอน จะมีปริมาณแตกต่างกันมากจากการวิเคราะห์แต่ละวิธี ดังตารางที่ 2.6 เนื่องจากการคำนวณนั้นขึ้นกับสมมุติฐานที่ใช้ ดังนั้นจึงมักสรุปปริมาณในรูปของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์แต่ละชนิดในแกลบประกอบด้วยธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในหน่วยของสัดส่วนน้ำหนัก (weight fraction) ต่างๆ กัน และสรุปปริมาณรวมของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, และออกซิเจน ได้เป็น 51.185 wt%, 6.935 wt% และ 41.88 wt% ตามลำดับ นอกจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่เป็นส่วนใหญ่แล้วบนผิวของแกลบจะมีซิลิกา ในรูปอสัณฐานกระจายตัวอยู่ จากผลการศึกษาของ Sharma เมื่อนำแกลบสดมาเผาจะได้แกลบ ในปริมาณระหว่าง 13-29 wt% ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ เช่น บรรยากาศและสภาพพื้นที่ที่ปลูกข้าว แกลบที่เผาได้ จะประกอบด้วยซิลิกอน ในรูปของซิลิกามากกว่า 87% และมีพวกอัลคาไลด์ และธาตุอื่นๆ อยู่บ้างเล็กน้อย ซิลิกาในแกลบอยู่ในรูปอสัณฐานซึ่งเชื่อมโยงอยู่กับองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ในชั้นอีพิเดอร์มิส ธาตุซิลิกอนในแกลบมีลักษณะเป็นธาตุบริสุทธิ์ เช่นเดียวกับซิลิกอนในควอตซ์ นอกจากนี้ ซิลิกาในแกลบซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐานและคาร์บอน มีพลังงานอิสระ (free energies) สูงกว่าซิลิกอนในควอตซ์ และคาร์บอนในกราไฟต์

ตารางที่ 2.6 สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของแกลบ[8]

| Constituent | Amount Present (wt%) | |
|---------------|------------------------|------------------------------|
| | จาก D.F. Houston, 1972 | จาก G.H. Nelson et. al, 1950 |
| Cellulose | 34-44 | 42.2 |
| Lignin | 19-47 | 19.2 |
| Hemicellulose | 17-26 | 26.0 |

Considered to be α -cellulose, Composition of lignin (S.M.Siegel, 1968) approximately (in wt%) 60 C. 6H. and 15-20 methyl (OCH₃) #Hemicellulose contains apporximatelt (in wt%) 59 D-xylose, 22 L-arabinose, 11-methylglucuronic acid, and 8 D-galactose

ตารางที่ 2.7 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแกลบ* [8]

| Constituent | Amount present in rice husk (wt%) | calculate weight fraction of element in constituent | | |
|-------------------------|-----------------------------------|---|--------|--------|
| | | C | H | O |
| α -cellulose | 43.30 | 0.444 | 0.0618 | 0.4938 |
| Lignin | 22.00 | 0.815 | 0.0925 | 0.0925 |
| D-xylose | 17.52 | 0.400 | 0.0670 | 0.5330 |
| L-Arabinose | 6.53 | 0.400 | 0.0670 | 0.5330 |
| Methoxylglucuronic acid | 3.27 | 0.404 | 0.0250 | 5710 |
| D-Galactose | 2.37 | 0.357 | 0.0720 | 0.5710 |
| Total (wt%) | | 51.185 | 6.935 | 41.88 |

*Excluding SiO₂

2.4.3 การทดสอบทางเคมีของแกลบ

ถึงแม้ว่าแกลบจะประกอบด้วยซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน แต่การเกิดผลึกสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายทีเดียวเมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากสิ่งเจือปนที่มีประจุบวก (cationic impurities) เกิดเป็น mineralizers ปี ค.ศ. 1989 ชูและคณะ [11] ทำการวิจัยและสรุปว่า เกิดสารประกอบของสิ่งเจือปนและซิลิก้าขึ้นโดยเคลือบอยู่ที่ผิวภายใน ดังนั้นจึงไปขัดขวางทางเข้าของ

ออกซิเจนหรือการระเหยของสาร นอกจากนี้ฝุ่นผงจากดินสามารถเกิด mineralizers ได้ ดังนั้นจึงต้องล้างแกลบและแยกสิ่งเจือปนด้วยวิธีทางเคมีก่อน เพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานอย่างสมบูรณ์ นักวิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีการแยกสกัดสิ่งเจือปนโดยการชะด้วยกรด เช่น 1:1 และ 1:3 ของ HCL/H₂O พบว่าซิลิกาในแกลบที่ทดสอบด้วยกรดและไม่ได้ทดสอบด้วยกรด จะมีปริมาณแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเมื่อชะด้วยกรดแล้ว แกลบจะมีซิลิกาอยู่สูงถึง 99% แต่การทดสอบด้วยกรดมีผลทำลายเส้นใยที่อยู่ในแกลบ ดังนั้นในการวิจัยบางอย่าง จึงไม่จำเป็นที่จะต้องทำการย่อยสลายด้วยกรด

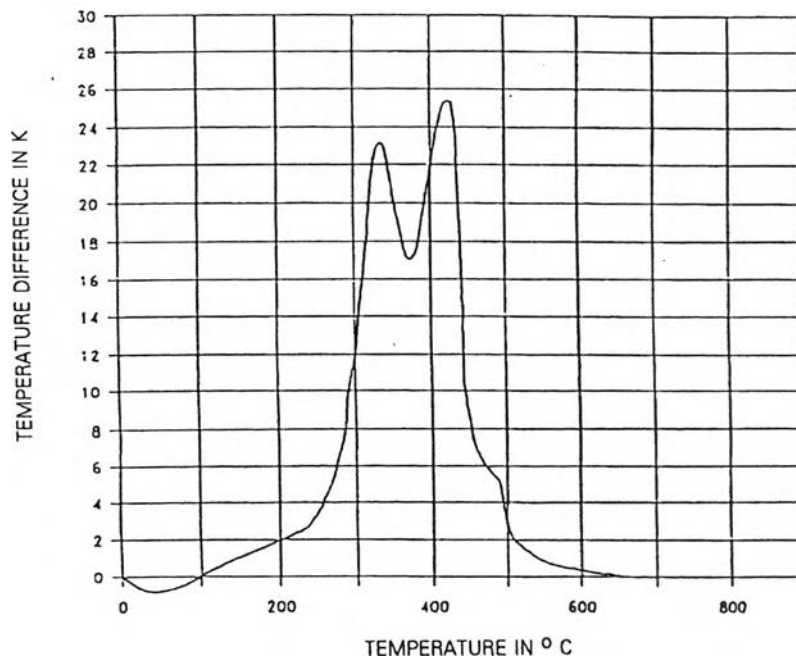
2.4.4 การเผาไหม้ของแกลบ (Combustion of husks)

การเผาไหม้ของแกลบ ศึกษาโดยเครื่องวิเคราะห์เทอร์มัลดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Thermal Analysis : DTA) และเทอร์โมกราวิเมตรีดิฟเฟอเรนเชียล / เทอร์โมกราวิเมตรี (Thermogravimetry / differential thermo-gravimetry : TG-DTG) รูปที่ 2.6 แสดงพีคของการเกิดปฏิกิริยาที่ประมาณ 330°C และที่ 425°C พบว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ประมาณ 650°C เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์จาก TG-DTG ในรูปที่ 2.7 พบว่า น้ำหนักของแกลบคงที่หลังจาก 600°C ซึ่งสารเซลลูโลสถูกทำลายเนื่องจากความร้อนด้วยกลไก 2 แบบ คือ

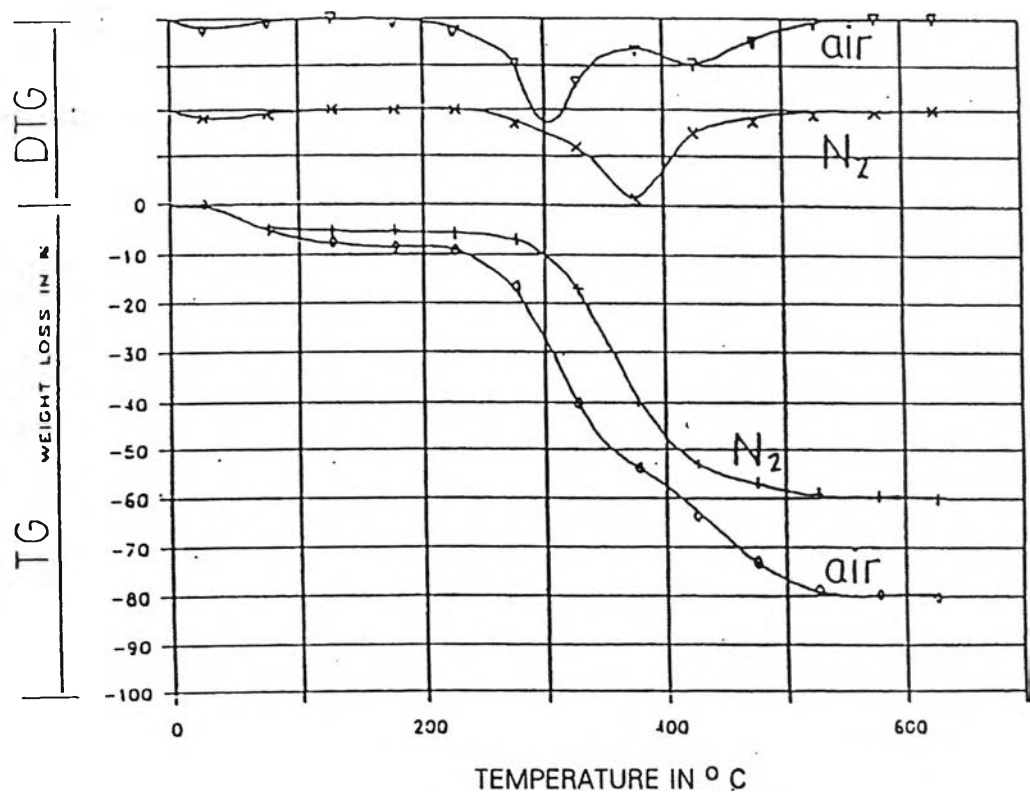
1. เกิดดีไฮเดรชัน (Dehydration) แล้วตามด้วยการเกิดถ่าน (charring)
2. เกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) และการระเหยกลายเป็นไอของสาร

ไฮโดรคาร์บอน

เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงเกินไปและเวลาที่ soak น้อยเกินไปจะเกิดผลึกขึ้น เนื่องจากการ collapse ของรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร ดังนั้น จากการศึกษาช่วงอุณหภูมิ 600°C - 650°C ที่เวลา soak น้อยกว่า 10 ชั่วโมง จะช่วยรักษาสภาพโครงสร้างอสัณฐานไว้ได้ ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้ต่ำมากสำหรับการเผาไหม้สารอินทรีย์ แต่เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงที่สุดในการรักษาสมบัติทางธรรมชาติของแกลบ



รูปที่ 2.6 DTA graph ของการเผาไหม้แก๊สในอากาศ ศึกษาโดย Ibrahim, Kabish and Kamal, 1987 [8]



รูปที่ 2.7 TG - DTG graph ของการเผาไหม้แก๊สในอากาศ และในบรรยากาศ ไนโตรเจน ศึกษาโดย James and roa, 1986 [8]

2.4.5 สถานะปัจจุบันของแกลบและเถ้าแกลบในประเทศไทย

วัตถุเหลือทิ้งทางการเกษตรในประเทศไทย เช่น แกลบ, ชังข้าวโพด, ชานอ้อย ฯลฯ ถูกผลิตขึ้นเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด เมื่อวัตถุเหลือทิ้งเหล่านี้เริ่มมีบทบาทต่ออุตสาหกรรม พบว่า แกลบ ได้รับความสนใจมากที่สุด เนื่องจากสามารถหาได้ทั่วๆ ไป นอกจากนี้การกระจายตัวของภาคอุตสาหกรรมไปสู่ชนบทซึ่งเป็นแผนพัฒนาของประเทศไทยและเป็นที่สนใจของประเทศกำลังพัฒนาอื่นๆ ด้วย

ประโยชน์ของแกลบและเถ้าแกลบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 ประเภทตามกรรมวิธีได้ดังนี้

1. ประโยชน์ของแกลบ
2. ประโยชน์ของถ่านแกลบ
3. ประโยชน์ของเถ้าแกลบ
4. ใช้เป็นแหล่งของคาร์บอน
5. ใช้เป็นสารซึ่งมีลักษณะคล้ายซิลิกา (Siliceous material)
6. ใช้เป็นแหล่งของซิลิกาและคาร์บอน

ประโยชน์ของแกลบและเถ้าแกลบในประเทศไทย เช่น

1. แกลบใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงสำหรับโรงสีข้าว
2. ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาไพโรไลซิส
3. เถ้าแกลบใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์
4. แกลบและเถ้าแกลบใช้ในอุตสาหกรรมอิฐ
5. ฟางข้าวใช้สำหรับวัสดุก่อสร้าง

ตารางที่ 2.8 สมบัติของแกลบไทย (Properties of Thai rice husk) [8]

| Properties | Value |
|-----------------------------------|-------------|
| Length (mm.) | 6-9 |
| Mohs Hardness | 6 |
| Bulk Density (Kg/m ³) | 95-150 |
| True Density (Kg/m ³) | 650-750 |
| Combustion Energy (Kcal/Kg) | 3,790-4,000 |
| Volatile Matter (%) | 61.10-64.34 |
| Ash (%) | 15.62-19.02 |
| Moisture (%) | 8.12-11.54 |
| Crude Protein (%) | 2.90-4.50 |
| Crude Fibre (%) | 39.10-42.25 |
| Crude Fat (%) | 1.0-1.7 |
| Nitrogen Free Extract (%) | 24.72-31.70 |
| Ether Soluble Extract (%) | 0.81-1.23 |
| Cellulose (%) | 36.5-39.0 |
| Lignin (%) | 31.5-34.0 |

จาก Report of International Research and Development Cooperation ITIT
Project No. 83-1-8, October 1986

2.5 พอลิเมอร์คอมโพสิต [12]

คอมโพสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกัน
อย่างเห็นได้ชัด (distinct components) อยู่ด้วยกัน องค์ประกอบหลักของคอมโพสิต คือ

1. ส่วนเสริมแรง (reinforcement) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรง
แก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ซึ่งได้แก่ เส้นใย
(fibers) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์
(Kevlar® fibers) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (continuous fibers) หรือเส้นใยสั้น
(discontinuous หรือ chopped shot fibers) นอกจากนี้ อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (weaves)

ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียงของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลัก (principle load-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต

2. เมทริกซ์ (matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

- พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Polymer Composites" สามารถใช้
ได้ทั้งพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซต
- โลหะ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Metal Composites"
- เซรามิก เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Ceramics Composites"

2.5.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต (Classification of Composites)

มีการแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตในหลายแบบ อาจแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย อาจเป็นเส้นใยสั้น (short fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (continuous fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแซนวิช (sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (beads) แผ่น (flake) หรือผง (powder) ที่มีขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1 ไมครอน)

2.5.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต

ข้อดีของวัสดุคอมโพสิต มีดังนี้

1. มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to weight/density ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) โมดูลัสจำเพาะ (specific modulus) ความเหนียวจำเพาะ (specific stiffness) ฯลฯ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา (พิจารณาตารางที่ 2.9)

2. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ

3. มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง

4. มีอายุการใช้งานยาวนาน มักมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี

5. มีสมบัติการรับแรงและแดมปีง (damping) ดี

6. ความทนทานต่อการล้า (fatigue resistance) ดี

7. มีเสถียรภาพของรูปร่าง (dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (coefficients of thermal expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต มีดังนี้

1. ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูป

2. มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัว (orientation) ของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (ransverse direction)

3. ยากในการต่อ (attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น

4. ยากในการตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต

5. ยากในการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (recycle)

ตารางที่ 2.9 สมบัติบางประการของวัสดุต่างๆ เทียบกับวัสดุคอมโพสิต[12]

| วัสดุ | Density g/cm ³ | Modulus (E) , GPa | Strength (σ) , MPa | E/ρ , 10 ⁶ N.m/kg | σ/ρ , 10 ³ N.m/kg |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|
| Al 6061-T6 | 2.70 | 68.9 | 310 | 25.7 | 115 |
| SAE 1010 Steel (cold-worked) | 7.87 | 207 | 365 | 26.3 | 46.4 |
| Ti-6Al-4V | 4.43 | 110 | 1171 | 25.3 | 26.4 |
| Nylon 6/6 | 1.14 | 2 | 70 | 1.75 | 61.4 |
| Unidirectional carbon fiber/epoxy | 1.55 | 137.8 | 1550 | 88.9 | 1000 |
| Unidirectional E-glass fiber/epoxy | 1.85 | 39.3 | 965 | 21.2 | 522 |
| Unidirectional Kevlar®49 fiber/epoxy | 1.38 | 75.8 | 1378 | 54.9 | 999 |
| Quasi isotropic carbon fiber/epoxy | 1.55 | 45.5 | 579 | 29.3 | 374 |
| Random glass fiber/epoxy | 1.55 | 8.5 | 110 | 5.48 | 71 |

2.5.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต (Composite Applications)

ในการประยุกต์งานวัสดุคอมโพสิต ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิตสามารถประยุกต์ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (automotive) เครื่องบิน (aircraft) ยานอวกาศ (aerospace) อุปกรณ์กีฬา (sporting goods) ฯลฯ ตารางที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้น ไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต [12]

| อุตสาหกรรม | ตัวอย่างการใช้งาน |
|-----------------|--|
| เครื่องบิน | ประตู ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง |
| ยานอวกาศ | กระสวยอวกาศ (space shuttle) สถานีอวกาศ (space station) |
| ยานยนต์ | ตัวถัง ส่วนประกอบเครื่องยนต์ กันชน |
| เรือ | ตัวถังเรือ (hulls) ดาดฟ้า (decks) |
| อุปกรณ์กีฬา | ไม้เทนนิส ไม้แบดมินตัน ก้านไม้กอล์ฟ ตัวถังจักรยาน สกี เรือแคนู หมวกกันกระแทก คันเบ็ด |
| เคมี | ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ |
| อุปกรณ์ก่อสร้าง | ฝาผนัง ประตู เฟอร์นิเจอร์ โต๊ะ เก้าอี้ บันได |
| อุปกรณ์ไฟฟ้า | แผงวงจรไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้า กล่องคอมพิวเตอร์ |

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ismail และผู้ร่วมงาน [13] ได้ทดลองนำเถ้าแกลบสีขาว (white rice husk ash, WRHA) มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ในปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr นอกจากนี้ยังมีการใช้ multifunctional additive (MFA) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมให้เถ้าแกลบและยางธรรมชาติเข้ากันได้ดี โดยปริมาณที่ใช้ คือ 1, 3, 5 และ 7 phr ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดของชิ้นทดสอบมีค่าสูงที่สุดเมื่อใส่เถ้าแกลบปริมาณ 10 phr และสมบัติทั้งสองจะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารตัวเติมที่มากเกินไปจะเกาะเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตาม มอดุลัสและความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การใส่ MFA มีผลทำให้เวลาการเกิดสคอริช (scorch time) และเวลาการบ่ม (cure time) ของยางธรรมชาติผสมเถ้าแกลบลดลง และการใส่ MFA มีผลทำให้สมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบดีขึ้น แต่ถ้าใส่มากกว่า 3 phr กลับทำให้การยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมและยางธรรมชาติลดลง สมบัติทางกายภาพต่างๆ จึงลดลง

Min และผู้ร่วมงาน [14] ได้ทดลองใช้รีแอคทีฟพอลิยูรีเทน (reactive polyurethane) เป็นสารดัดแปรความต้านแรงกระแทก (impact modifier) เพื่อเพิ่มความเหนียวของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยศึกษาผลของปริมาณพอลิยูรีเทนที่ใช้ในการดัดแปร ผลการทดลองแสดงถึงโครงสร้างร่างแหที่เกิดขึ้นว่ามาจากหมู่ไอโซไซยานูเอตใน MDI ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว นอกจากนี้ ชิ้นทดลองที่เตรียมได้มีความเหนียวมากที่สุดเมื่อมีปริมาณ

พอลิยูรีเทนประมาณ 2% โดยน้ำหนัก และความเหนียวจะลดลงเมื่อปริมาณพอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโอลที่เหลืออยู่และไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยา

Cherian และผู้ร่วมงาน [15] ได้ทดลองปรับปรุงความต้านแรงกระแทกของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยผสมกับอีลาสโตเมอร์ผ่านการดัดแปร ได้แก่ hydroxyl terminated polybutadiene, ยางธรรมชาติ อีพอกซีไดซ์ (ENR), hydroxyl terminated natural rubber และ maleated nitrile rubber ผลจากการทดลอง พบว่า ยางที่ผ่านการดัดแปรเหล่านี้สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวและขึ้นทดสอบมีความเหนียวสูงกว่าการใช้อีลาสโตเมอร์ ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร นอกจากนี้ การใช้ maleated nitrile rubber จะปรับปรุงสมบัติได้มากที่สุด

Kumar และผู้ร่วมงาน [16] ได้ทดลองเตรียมแผ่นทดสอบจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เติมแต่งด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต และแก้วกลบทั้งสีขาวและสีดำ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะใช้แก้วกลบซึ่งมีเป็นจำนวนมาก และเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่มีการเพาะปลูกข้าว จากผลการทดสอบพบว่าแก้วกลบสีดำทำให้มอดูลัสการดัดโค้ง และอีลาสติคมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นรวมทั้งลดการบวมตัวและการดูดซึมน้ำได้มากขึ้น และจากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM พบว่า แก้วกลบสีดำมีสัณฐานวิทยาเป็นเส้นใย จึงทำหน้าที่เสริมแรงได้ดีกว่าแก้วสีขาวซึ่งเป็น สัณฐาน นอกจากนี้ การที่แก้วกลบสีดำทำให้มีการบวมตัวและการดูดซึมน้ำต่ำ เนื่องจากบนผิวของแก้วกลบสีดำมีสารคาร์บอนเซียสซึ่งมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในขณะที่แก้วสีขาวไม่มีสารคาร์บอนเซียส

Chuaijuljit และผู้ร่วมงาน [17] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยใช้ยางธรรมชาติกราฟต์พอลิสไตรีนเป็นสารช่วยผสม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ยางธรรมชาติกราฟต์พอลิสไตรีนช่วยให้ยางธรรมชาติกระจายตัวได้ดีในพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวอย่างเห็นได้ชัด เพราะถ้าหากไม่มียางธรรมชาติกราฟต์พอลิสไตรีนเป็นสารช่วยผสมแล้ว จะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบได้เลย โดยจะเกิดการแยกเฟสอย่างเห็นได้ชัด และขึ้นทดสอบจะบวมปูดและไม่เรียบ นอกจากนี้ ปริมาณพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ และปริมาณกราฟต์โคพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสมมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ถ้าปริมาณพอลิสไตรีนซึ่งเป็นเฟสที่แข็งและเปราะในกราฟต์โคพอลิเมอร์เพิ่ม ขึ้นจะทำให้ชิ้นงานมีความต้านแรงกระแทกต่ำลง

Rozman และผู้ร่วมงาน [18] ได้ทดลองเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวและแก้วเพื่อศึกษาสมบัติความต้านแรงดึง ความต้านแรงดัดโค้ง ความต้านแรง

กระแทก และความคงขนาด จากผลการทดลอง พบว่า ความต้านแรงดึง ความต้านแรงดัดโค้ง และความต้านแรงกระแทกลดลงเมื่อปริมาณแกลบเพิ่มขึ้น โดยวัสดุเชิงประกอบที่ถูกเตรียมขึ้น มาจะใช้แกลบขนาดต่างๆ กัน คือ 35-60 mesh (500-250 μm), 60-80 mesh (500-180 μm), 100-140 mesh (150-38 μm) และปริมาณแกลบที่เติมลงไป คือ 42, 57 และ 72% ผลจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า การใช้แกลบขนาดละเอียดจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าแกลบที่มีขนาดหยาบ เนื่องจากแกลบที่มีขนาดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวมากกว่า จึงเกิดแรงยึดเกาะระหว่างหมู่ OH ของแกลบกับหมู่ C=O ของพอลิเอสเทอร์เมทริกซ์